

## ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРИ

УДК 621.928.9

<sup>1</sup>Полутренко М. С., <sup>2</sup>Параняк Н. М.<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу,<sup>2</sup>НУ «Львівська політехніка»

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАЕКТОРІЙ РУХУ ЗВАЖЕНИХ ЧАСТИНОК У ЗАКРУЧЕНИХ ПОТОКАХ ТА ДОЦІЛЬНІСТЬ ОХОЛОДЖЕННЯ ЗАПИЛЕНОГО ПОТОКУ ПОВІТРЯ

Проведено математичне моделювання траєкторій руху частинок пилу, їхніх швидкостей, статичного та динамічного тисків у різних перерізах створених конструкцій пиловловлювачів. Обґрунтовано доцільність охолодження повітряного потоку перед його потраплянням у пиловловлювач, що має позитивний вплив на сепарацію частинок пилу до зовнішньої стінки апарата і, як наслідок, підвищення ефективності їхнього уловлення.

**Ключові слова:** пил, пиловловлювач, очищення повітря, ефективність, екологічна ситуація.

Проведено математическое моделирование траекторий движения частиц пыли, их скоростей, статического и динамического давлений в разных сечениях созданных конструкций пылеулавливателей. Обосновано целесообразность охлаждения воздушного потока перед его попаданием в пылеулавливатель, которое имеет положительное влияние на сепарацию частиц пыли к внешней стенке аппарата и, как следствие, повышение эффективности их улавливания.

**Ключевые слова:** пыль, пылеулавливатель, очистка воздуха, эффективность, экологическая обстановка.

Mathematical modelling of movement trajectories of dust particles, their velocities, static and dynamic pressures in different sections of the constructed dust collectors has been carried out and accuracy of the choice has been justified. Expediency of airflow cooling before entering the dust collector has been proved. It has a positive impact on the separation of the dust particles at the outer wall of the device and, consequently, the efficiency of dust collection increases.

**Keywords:** dust, dust collector, air purification, efficiency, environmental situation.

**Актуальність проблеми.** На сьогодні через надмірне і нерівномірне навантаження різних галузей промисловості на природне середовище екологічна ситуація в Україні є вкрай незадовільною. Особливе занепокоєння викликає цементна промисловість, яка є однією з найбільш небезпечних за пиловим чинником. Понад 80% пилу, що викидається в атмосферу, виділяється обертовими печами випалюванням клінкеру. Особливо небезпечним є дрібнодисперсний пил (розмір частинок менше  $10^{-5}$  м), який згубно впливає на флору і фауну. На території його впливу формуються біогеохімічні аномалії, які спричинені техногенною концентрацією цементного пилу в ґрунтах і довкіллі [3]. З огляду на це, зменшення кількості забруднень, що надходять в природне середовище з промислових об'єктів, розроблення та впровадження нових безвідходних технологій виробництва із використанням газоочисних апаратів нових конструкцій, є актуальною проблемою. Розв'язання даної проблеми сприятиме зменшенню техногенних забруднень і підвищенню рівня екологічної безпеки на всіх ієрархічних рівнях: держави, регіону, міста, об'єкту.

Зниження пилових викидів до гранично-допустимих концентрацій (ГДК) можна здійснити шляхом впровадження нових та інтенсифікації існуючих технологічних процесів очищення.

У зв'язку з викладеним вище, метою даної роботи є розроблення математичної моделі руху пилогазового потоку в корпусі апарату для створення високоефективного обладнання уловлення дрібнодисперсного пилу.

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз аеродинамічних характеристик потоку в пиловловлювачі нової конструкції проводили за допомогою пакету FlowVision. Модель апарату створювалася засобами системи автоматизованого проектування SolidWorks, а потім імпортована у програмний комплекс для дослідження аеродинаміки процесу повітроочищення [1]. Застосовували математичну модель руху нестискуваної рідини, яка ґрунтується на рівняннях Нав'є-Стокса, рівняннях нерозривності, дифузійного переносу скалярної величини, законі збереження енергії та рівняннях к-ε моделі турбулентності, у якій турбулентна в'язкість  $\alpha_t$  виражається через величини к-ε наступним чином [6]:

$$\alpha_t = C_a \rho \frac{k^2}{\varepsilon} f_a, \quad (1)$$

де  $k$  – масова турбулентна кінетична енергія, Дж/кг;  
 $\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії, Дж/(кг·с);  
 $\alpha_t$  – динамічний коефіцієнт турбулентної в'язкості, Па;  
 $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  
 $f_a = f_a(t)$  – функція залежності від часу;  
 $C_a$  – константа.

Модель ґрунтується на наступних основних рівняннях:

- рівняння Нав'є-Стокса [5]

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla(V \otimes V) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla((\alpha + \alpha_t)(\nabla V + (\nabla V)^T) + S), \quad (2)$$

$$\nabla V = 0,$$

де  $V$  – об'єм, м<sup>3</sup>;  
 $t$  – час, с;  
 $\alpha$  – коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу, К<sup>-1</sup>; коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $T$  – абсолютна температура, К;  
 $P$  – гідростатичний тиск, Па;

де джерело  $S = \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right)g + B + \frac{R}{\rho}$ ;

$B$  – сили обертання;  
 $R$  – універсальна газова стала, Дж/(кг·К);  
 - рівняння ентальпії

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(Vh) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \frac{\lambda}{C_p} + \frac{\alpha_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho}, \quad (3)$$

$\lambda$  – теплопровідність, Вт/(м·К);  
 $C_p$  – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг·К);  
 $Pr_t = 0,5$  – емпірична константа;  
 $Q$  – кількість теплоти, Д;  
 $h$  – напір, що визначається рівністю;  
 $h = \frac{p}{\rho g} - y$ ;

$\rho$  – щільність, кг/м<sup>3</sup>;

- рівняння для визначення  $k$  та  $\varepsilon$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(Vk) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \frac{G}{\rho} - (\varepsilon - \varepsilon_{ini}) - F, \quad (4)$$

де  $\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії, Дж/(кг·с);

$\varepsilon_{ini}$  – початкове значення турбулентної дисипації;

$k$  – масова турбулентна кінетична енергія, Дж/кг;

$\sigma_k$  – активна (або ефективна) пористість середовища, у якій відбувається фільтрація розчину;

$t$  – час у добі;

$\alpha_t$  – коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу, К<sup>-1</sup>; коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$G$  – функція Жуковського.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(V\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left( C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 f_1(\varepsilon - \varepsilon_{ini}) \right), \quad (5)$$

$$G = \alpha_{eff} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right); \quad (6)$$

$C_0$  – коефіцієнт закручування потоку,  $C_1, C_2$  – довільні сталі.

- рівняння масопереносу

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(VC) = \frac{1}{\rho} \nabla \left( \left( \rho D + \frac{\alpha_t}{Sc_t} \right) \nabla C \right) \quad (7)$$

де  $Sc$  – турбулентне число Шмідта – емпірична константа моделі;

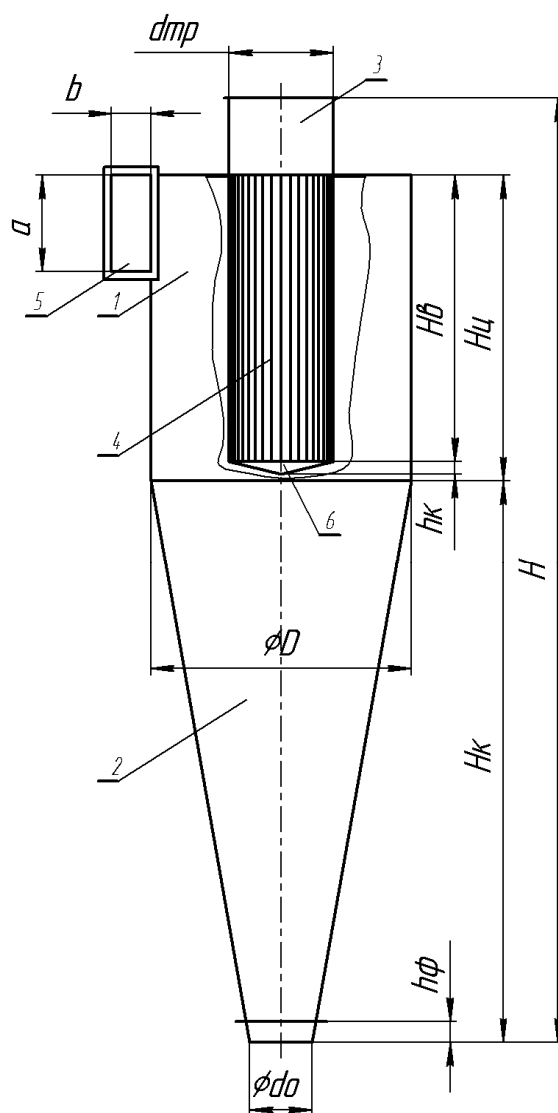
$D$  – коефіцієнт конвективної дифузії, м<sup>2</sup>/добу [4];

$D = d/dx$  – оператор диференціювання.

Дослідження проводили спочатку для моделі відцентрово-інерційного - базового апарата (рис. 1), яку будували за допомогою САПР SolidWorks, на основі математичної моделі, яка описує рух пилоповітряного потоку при малих числах Рейнольдса  $Re < 2300$  [2, 5]. Вважали, що стінки пиловловлювача є адіабатичними [6]. Повітряний потік потрапляє у пиловловлювач через вхідний патрубок зі швидкістю 18 м/с.

Геометричні розміри пиловловлювача і жалюзійного відокремлювача наведені на схемі жалюзійного відокремлювача (рис. 1) і є наступними: внутрішній діаметр вихлопної труби –  $d_{тр} = 0,34D$ ; внутрішній діаметр отвору для видалення пилу –  $d_o = 0,229D$ ; висота вхідного патрубка (внутрішній розмір) –  $a = 0,38D$ ; ширина вхідного патрубка  $b = 0,15D$ ; висота установки фланця  $h_{\phi} = 0,1D$ ; внутрішній діаметр  $D$ ; висота циліндричної частини  $H_{ц} = 1,2D$ ; висота вихлопної труби  $H_{т} = 0,25D$ ; висота конічної частини  $H_{к} = 2,6D$ ; загальна висота апарата  $H = 3,7D$ ; висота жалюзійного відокремлювача  $H_{в} = 0,7D$ ; зовнішній радіус жалюзійного відокремлювача  $r_2 = 0,36D$ ; внутрішній радіус жалюзійного відокремлювача  $r_1 = 0,34D$ ; радіус вигину профілів  $R_g$ ; радіус центрів дуг  $R_{ц}$ ; кількість жалюзі у відокремлювачі  $n = 20-25$ ; висота конічної вставки  $h_{к} = 0,035D$ ;  $R$  – радіус циліндричної частини апарата, дорівнює 0,7 м.

Параметри жалюзі були вибрані відповідно до [7]. Довжина корпусу для пилу з медіанним діаметром:  $8 \cdot 10^{-6}$  м –  $925 \cdot 10^{-3}$  м;  $32 \cdot 10^{-6}$  м –  $825 \cdot 10^{-3}$  м;  $50 \cdot 10^{-6}$  м –  $725 \cdot 10^{-3}$  м. Довжина циліндричної частини корпусу апарата складає для пилу з медіанним діаметром:  $8 \cdot 10^{-6}$  м –  $800 \cdot 10^{-3}$  м;  $32 \cdot 10^{-6}$  м –  $700 \cdot 10^{-3}$  м;  $50 \cdot 10^{-6}$  м –  $600 \cdot 10^{-3}$  м.



1 – циліндричний корпус; 2 – конічна частина; 3 – вихлопна труба;  
4 – жалюзійний відокремлювач; 5 – вхідний патрубок; 6 – конічна вставка

**Рис. 1. Схема циклонного апарату з жалюзійним відокремлювачем**

Аеродинаміка потоку відображена на рис. 2. Обертання потоку відбувається всередині корпусу апарату навколо його вертикальної осі. Швидкість руху повітряного потоку відображена кольором траєкторії. Розглядали рух частинок експериментального цементного пилу у пиловловлювачах при різних значеннях температури повітряного потоку на вході в апарат.

Частинки, діаметр яких дорівнює  $8 \cdot 10^{-6}$  м при температурі потоку 473 К (рис. 2) рухаються до зовнішньої стінки апарату повільно і досягають її вже за половину оберту потоку навколо вертикальної осі пиловловлювача. При підвищенні температури до 1173 К (рис.3) рух таких частинок кварцового піску не досягає периферії апарату, оскільки частинки починають рухатися по концентричних колах навколо осі [1]. Деякі з них будуть захоплені радіальним стоком і потраплять у вихлопну трубу. Інші – опустяться до конічної частини апарату. Такі частинки не будуть уловлені, що призведе до зниження ефективності очищення потоку. На рух частинок пилу, еквівалентний діаметр яких складає  $32 \cdot 10^{-6}$  м температура потоку на вході має значно менший вплив (рис. 4). Такі частинки пилу мають дещо інший характер руху в циклоні. Вони рухаються «скачками», вдаряючись до зовнішньої стінки та вихлопної труби.

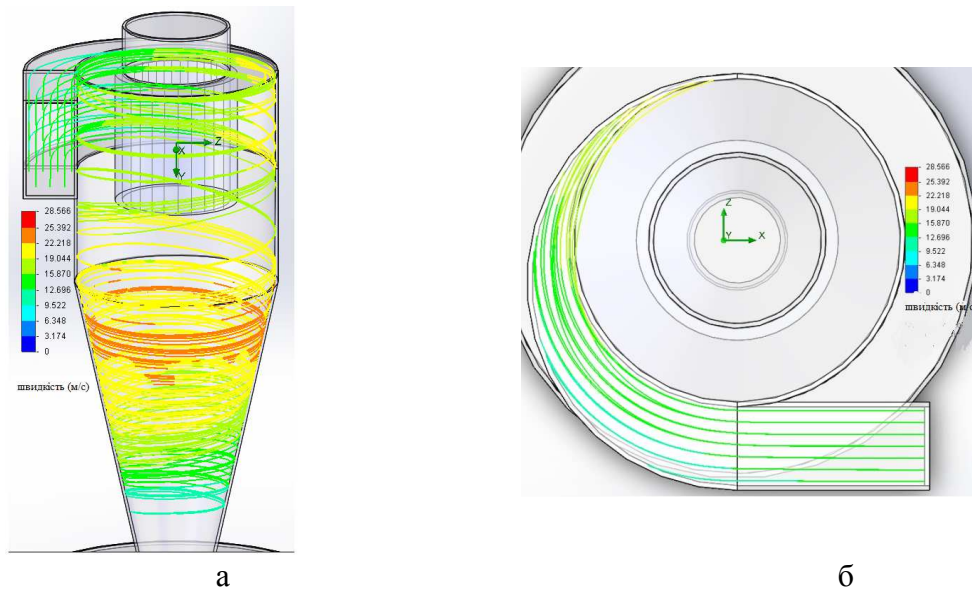


Рис. 2. Траєкторії руху частинок пилу  $8 \cdot 10^{-6}$  м при температурі потоку на вході 473 К

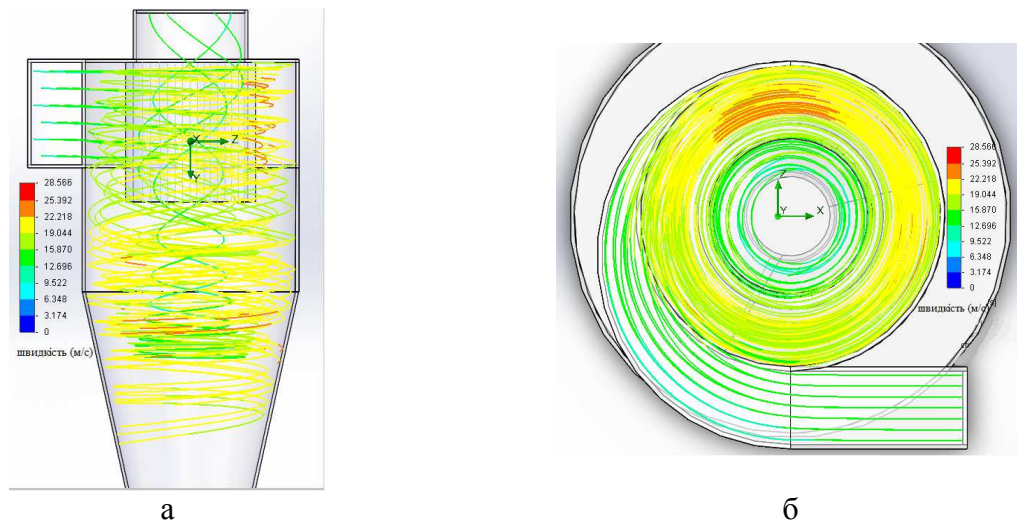


Рис. 3. Траєкторії руху частинок пилу  $8 \cdot 10^{-6}$  м при температурі потоку на вході 1173 К

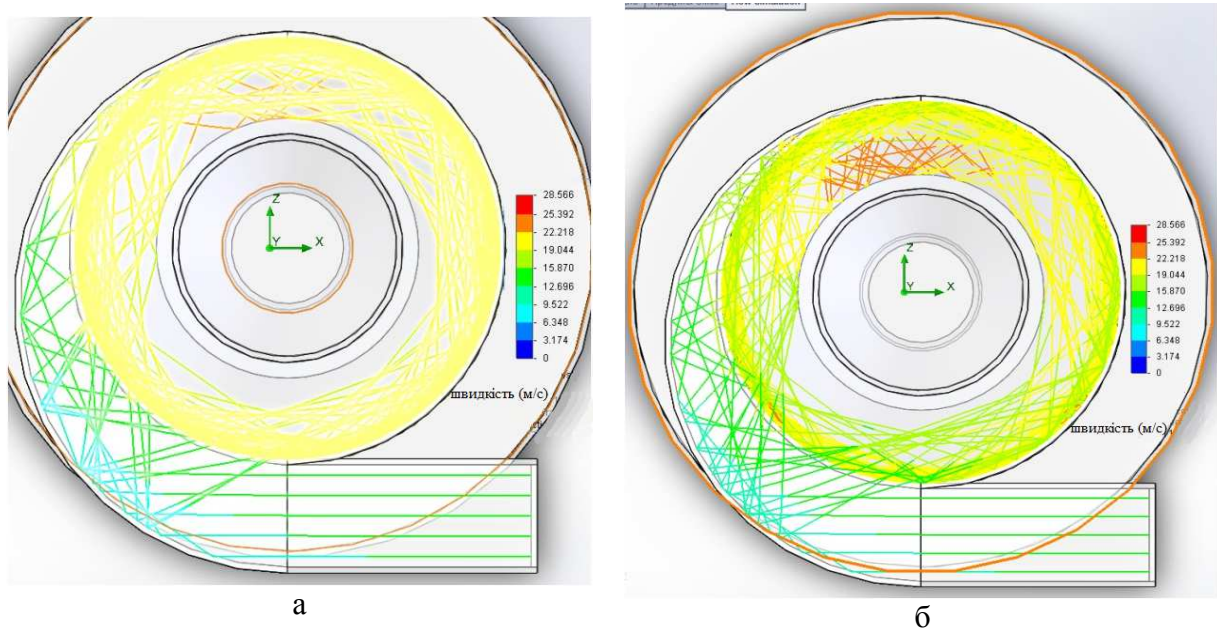


Рис. 4. Траєкторії руху частинок пилу  $32 \cdot 10^{-6}$  м (а) та  $50 \cdot 10^{-6}$  м (б) при температурі потоку на вході 1173 К

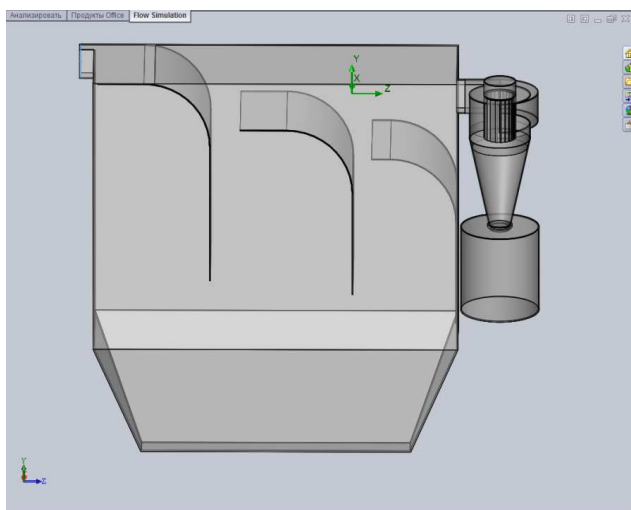
Гідравлічний опір  $\Delta P$  апарата визначали як різницю повних тисків у вхідному патрубку та на виході з вихлопної труби.

Проведені дослідження запропонованого пиловловлювача з жалюзійно-відокремлювачем із попередньою очисткою, де гофри є параболічної форми і утворюють між собою зигзагоподібні канали. Перевагою запропонованого пиловловлювача є виключення попадання великодисперсного пилу в середину другого ступеня очистки, що важливо також для запобігання зносу його корпусу через значне зменшення концентрації та фракційного складу пилу. Наявність зигзагоподібних каналів у всіх можливих напрямках руху газу запобігає створенню зон збільшеного тиску, а це в свою чергу призводить до збільшення ефективності роботи цієї ступені очистки і зниження гідравлічного опору.

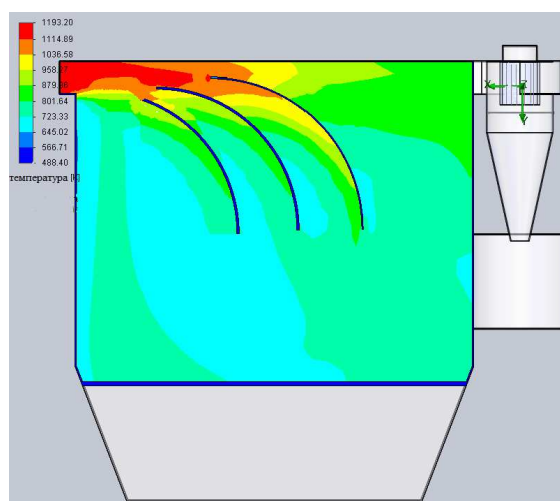
Спільним недоліком багатьох відомих конструкцій пиловловлювачів є значне зниження ефективності їх роботи через необхідність частої заміни пиловловлювача, який виходить з ладу через високу температуру пилогазового потоку, що в нього подається, а також погіршенням аеродинамічних характеристик потоку через високу температуру пилогазового потоку, який в ньому рухається [2]. Тому перед подачею в відцентрово-інерційний апарат повітряний потік необхідно охолодити. Для цього можемо використати спеціальні теплообмінники (пилова камера), які дозволяють знизити температуру з 1173 К до 473 К. Для зниження температури запиленого потоку до 473 К було запропоновано застосувати конструкцію пиловловлювача з пилоосаджувальною камерою з зигзагоподібними гофрами (рис. 5).

Окрім зниження температури це дозволить знизити абразивність потоку за рахунок того, що в камері будуть вловлені великодисперсні частинки (рис. 6). Застосування пилоосаджувальної камери для зниження температури потоку має кілька переваг у порівнянні з охолоджувачем. По-перше гідравлічний опір пилоосаджувальної камери є незначним. По-друге за рахунок великої площі поверхні процес тепловіддачі буде проходити доволі швидко. Таким чином застосування в технологічних процесах виробництва будівельних матеріалів пило-вловлювача з пиловою камерою дозволяє знизити температуру пилогазового потоку на 700 градусів.

При необхідності зниження температури більш ніж на 700 градусів можна збільшити геометричні розміри пилоосаджувальної камери, але ці зміни призведуть до збільшення гідравлічного опору установки. В такому випадку необхідно буде вибирати між необхідністю зниження температурних режимів і енергоємністю.



**Рис. 5. Конструкція пилоосаджувальної камери з зигзагоподібними гофрами**



**Рис. 6. Розподіл температури потоку в пилоосадочній камері з зигзагоподібними гофрами**



**Висновки.** За допомогою FlowVision обґрунтовано доцільність охолодження повітряного потоку перед його потраплянням у пиловловлювач, що має позитивний вплив на швидкість руху частинок пилу до зовнішньої стінки апарата і, як наслідок, підвищення ефективності їх уловлення.

Перспектива впровадження таких пиловловлюючих конструкцій в аналогічні підприємства дасть змогу знизити викиди дрібнодисперсного пилу в довкілля, що призведе до покращення екологічної ситуації в районах розміщення даних виробництв.

### Література

1. Батлук В.А. Модель впливу інерційних сил і сил опору на рух частинки у відцентрово-інерційних пиловловлювачах / В.А. Батлук, Н.М. Параняк, Е.В. Романцов // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка та технологія – 2011». – К.: НТУУ «КПІ». – 2011. – №63. – С. 180–184.
2. Вальдберг А.Ю. Технология пылеулавливания / А.Ю. Вальдберг. – Л.: Машиностроение, 1985. – 192 с.
3. ГОСТ 17.2.4.06–90. Охрана природы. Атмосфера. Методы определения давления и температуры газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. – Введ. 1991-01. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 14 с.
4. Деньгуб В.М. Единицы величин. Словарь-справочник. / В.М. Деньгуб, В.Г. Смирнов. – М.: Изд. стандартов, 1990. – 240 с.
5. Страус В. Промышленная очистка газов: [пер. с англ.] / В. Страус. – М.: Химия, 1981. – 616 с.
6. Rogers C.B. The behavior of small particles in a vertical turbulent boundary layer in air / C.B. Rogers, J.K. Eaton // Int. J. Multiphase Flow. – 1990. – V. 16. – №5. – P. 819 – 834.
7. Yuanhui Zh. Modeling and Sensitivity Analysis of Dust Particle Separation for Uniflow Dedusters. University of Illinois Urbana. – Champaign, 2000. P. 1–13.

*Поступила в редакцію 12 листопада 2015 р.*

*Рекомендував до друку д. тех. наук Я. О. Адаменко*

УДК 502.3:504.5:621.43.068.4

**Кундельська Т. В.,  
Бринуш Н. П., Євчук О. П.**  
*Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу*

### **ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ОКСИДОМ ВУГЛЕЦЮ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВІД АВТОТРАНСПОРТУ ПО ВУЛ. ДОВГІЙ В м. ІВАНО-ФРАНКІВСЬКУ**

Розраховано концентрацію чадного газу (СО) від викидів автотранспорту по вулиці Довгій в м. Івано-Франківськ. Визначено склад автотранспорту, характеристики вулиці: тип вулиці, нахил, проведено вимірювання швидкості вітру та вологості повітря.

Проаналізовано результати досліджень у 2015 році та проведено порівняльний аналіз з результатами 2013-2014 рр.

**Ключові слова:** Оксид вуглецю(СО), автотранспорт, викиди, атмосферне повітря, забруднення, ГДК.